

原稿記載③<sup>a</sup>

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開 2000-78081

(P 2000-78081 A)

(43) 公開日 平成12年3月14日 (2000. 3. 14)

(51) Int. Cl. 7	識別記号	F I	テーマコード (参考)
H 0 4 B	10/02	H 0 4 B	9/00 M
	10/18		3/04 A
	3/04		9/00 J
	10/17		
	10/16		
審査請求 未請求 請求項の数 1 0		O L	(全 1 4 頁)

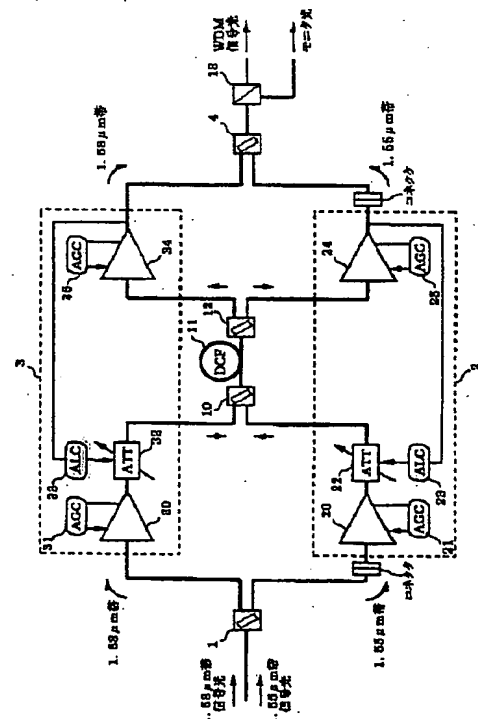
(21) 出願番号	特願平10-249658	(71) 出願人	000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(22) 出願日	平成10年9月3日 (1998. 9. 3)	(72) 発明者	木下 進 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
		(72) 発明者	菅谷 靖 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
		(74) 代理人	100078330 弁理士 笹島 富二雄

(54) 【発明の名称】 波長分散補償機能を備えた光増幅器及び光通信システム、並びに波長多重信号光の波長分散補償方法

(57) 【要約】

【課題】 広帯域の波長多重信号光に対する波長分散を補償可能にする簡易な構成の光増幅器及び光通信システムを提供し、また、非線形光学効果の発生確率を低減する波長多重信号光の波長分散補償方法を提供する。

【解決手段】 本光増幅器は、光伝送路から送られる波長多重信号光をWDMカプラ1で1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯に分波して各波長帯用の光ファイバ増幅部2, 3に送る。そして、各可変光減衰器22, 32を通過した各波長帯の信号光をWDMカプラ10で一旦合波してDCF11に送り、各波長帯に対する分散補償を一括して補償する。さらに、DCF11を通過した信号光をWDMカプラ12で再び分波し、各波長帯の光ファイバ増幅器24, 34で増幅した後に、WDMカプラ4及び光カプラ13を介して光伝送路に送出する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光波長に応じて複数の波長帯域に分波し、複数の光増幅手段により前記分波した各波長帯域の光をそれぞれ増幅し、該増幅した光を合波する構成の光増幅器であって、

波長分散を補償する波長分散補償手段と、

前記各光増幅手段内の各々の波長帯域の光を一旦取り出し合波して前記波長分散補償手段に入力するとともに、前記波長分散補償手段から出力される光を前記各波長帯域に分波して前記各光増幅手段に戻す光合分波手段と、を備えて構成されたことを特徴とする波長分散補償機能を備えた光増幅器。

【請求項 2】 前記各光増幅手段は、直列に接続された前段光増幅部及び後段光増幅部を備え、

前記光合分波手段は、前記各光増幅手段の前段光増幅部及び後段光増幅部の間から光を取り出すことを特徴とする請求項 1 記載の波長分散補償機能を備えた光増幅器。

【請求項 3】 前記光増幅手段の前記前段光増幅部と前記光合分波手段との間に、可変光減衰器を設けたことを特徴とする請求項 2 記載の波長分散補償機能を備えた光増幅器。

【請求項 4】 前記可変光減衰器は、前記後段光増幅部から出力される光のパワーが一定レベルになるように光減衰量が制御され、

前記前段光増幅部及び前記後段光増幅部は、利得が一定になるように制御されることを特徴とする請求項 3 記載の波長分散補償機能を備えた光増幅器。

【請求項 5】 前記波長分散補償手段が、分散補償ファイバであり、

前記光合分波手段は、前記分散補償ファイバの両端部にそれぞれ接続される 2 つの光合分波器を有し、前記各光増幅手段から一旦取り出した光のうちの隣り合う波長帯域の光が、異なる前記光合分波器を介して前記分散補償ファイバにそれぞれ入力されることを特徴とする請求項 1～4 のいずれか 1 つに記載の波長分散補償機能を備えた光増幅器。

【請求項 6】 前記各光合分波器が、光サーキュレータであることを特徴とする請求項 5 記載の波長分散補償機能を備えた光増幅器。

【請求項 7】 光波長に応じて複数の波長帯域に分波し、複数の光増幅手段により前記分波した各波長帯域の光をそれぞれ増幅し、該増幅した光を合波する構成の光増幅器であって、

予め設定した波長に対する分散量を基準として、波長分散を補償する第 1 波長分散補償手段と、

前記各光増幅手段に送られた各々の波長帯域の光を一旦取り出し合波して前記第 1 波長分散補償手段に入力するとともに、前記第 1 波長分散補償手段から出力される光を前記各波長帯域に分波して前記各光増幅手段に戻す光合分波手段と、

前記第 1 波長分散補償手段で補償されなかった波長分散を各波長帯域毎に個別に補償する第 2 波長分散補償手段と、

を備えて構成されたことを特徴とする波長分散補償機能を備えた光増幅器。

【請求項 8】 光伝送路を介して直列に接続された複数の光増幅中継器を用いて波長多重信号光を多中継伝送する光通信システムにおいて、

前記複数の光増幅中継器は、光波長に応じて複数の波長帯域に分波し、複数の光増幅手段により前記分波した各波長帯域の光をそれぞれ増幅し、該増幅した光を合波する構成の光増幅器であって、それら複数の光増幅中継器は第 1 と第 2 の構成を有し、

前記第 1 の構成の光増幅中継器は、予め設定した波長に対する分散量を基準として前記波長多重信号光の波長分散を補償する 1 つの波長分散補償手段と、前記各光増幅手段に送られた各々の波長帯域の光を一旦取り出し合波して前記波長分散補償手段に入力するとともに、前記波長分散補償手段から出力される光を前記各波長帯域に分波して前記各光増幅手段に戻す光合分波手段と、を備え、

前記第 2 の構成の光増幅中継器は、前記波長分散補償手段で補償されなかった波長分散を各波長帯域毎に個別に補償可能な波長分散補償手段を備えたことを特徴とする光通信システム。

【請求項 9】 前記第 1 の構成の光増幅中継器と前記第 2 の構成の光増幅中継器とが、1 つおきに交互に配置されたことを特徴とする請求項 8 記載の光通信システム。

【請求項 10】 波長多重信号光の波長分散を分散補償ファイバを用いて補償する波長多重信号光の波長分散補償方法において、

前記波長多重信号光を波長に応じて複数の波長帯域に分波し、

該分波した光のうちの隣り合う波長帯域の光を、前記分散補償ファイバの異なる端部からそれぞれ入力し、前記分散補償ファイバの各端部からそれぞれ出力される各波長帯域の光を合波してなることを特徴とする波長多重信号光の波長分散補償方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、波長の異なる複数の信号光が多重された波長多重信号光を増幅する光増幅器、及び複数の光増幅中継器を介して波長多重信号光を多中継伝送する光通信システム、並びに波長多重信号光の波長分散を分散補償ファイバを用いて補償する波長多重信号光の波長分散補償方法に関し、特に、広帯域の波長多重信号光に対する波長分散を補償可能にする波長分散機能を備えた光増幅器及び光通信システム、並びに非線形光学効果の発生を抑えた波長多重信号光の波長分散補償方法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】近年、波長多重(WDM)光通信システムの研究開発が精力的に進められており、多重する波長数は増加の一途を辿っている。これに伴い、信号帯域もますます広がりつつある。また、光増幅器を線形中継器として使用する光増幅中継伝送方式を適用したWDM光通信システムの開発も進められている。

【0003】このようなWDM光増幅中継伝送システムにおいては、複数の波長成分を含んだ、例えば1.53~1.56 $\mu$ mの波長帯(以下、1.55 $\mu$ m帯とする)の信号光を光増幅器で一括して増幅することができ、簡素な構成で大容量かつ長距離の光伝送が可能である。さらに、光増幅器の帯域拡張性に着目し、例えば、1.57~1.60 $\mu$ mの長波長帯(以下、1.58 $\mu$ m帯とする)を新たな伝送帯域とするシステムも提案されている。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】ところで、上記のような光通信システムにおいて、例えば、波長が1.3 $\mu$ m付近で零分散となる単一モード光ファイバ(SMF)等で構成される光伝送路を用いて、1.55 $\mu$ m帯の信号光を長距離伝送するような場合、光伝送路の波長分散特性により、高速の伝送速度で信号光を伝送すると波形が歪んでしまうという問題がある。

【0005】一般的な1.3 $\mu$ m零分散SMFは、1.55 $\mu$ m付近で約18ps/nm/km程度の波長分散がある。例えば、1.55 $\mu$ mの信号光を50km伝送した場合には、900ps/nm(=18[ps/nm/km] $\times$ 50[km])の波長分散が累積することになる。これは、一般に1次の分散と呼ばれ、波長幅1nm当たり900psの遅延差が生じることを意味する。

【0006】この遅延差が伝送特性に影響を及ぼすかは、信号光のタイムスロットに関係する。即ち、信号光のタイムスロットが波長分散による遅延差よりも十分に長い場合には伝送波形への影響は小さいが、タイムスロットが遅延差に近くなると波長分散の影響が大きくなって波形が歪むようになる。一般に、1波あたりの信号光の伝送速度がおよそ2.5Gb/sを超えると、波長分散の補償が必要になると考えられている。例えば、信号光の伝送速度が10Gb/sの場合には、タイムスロットが100psとなり、上記の場合の900ps/nmの波長分散は伝送特性に非常に大きな影響を及ぼすことになる。

【0007】光ファイバ伝送路の波長分散特性を補償するには、伝送路とは逆の波長分散特性をもつ分散補償器に信号光を通せばよい。900ps/nmの波長分散を補償する場合には、-900ps/nmの波長分散を有する分散補償器を使用することになる。このような分散補償器としては、例えば、分散補償ファイバ(DCF)などが広く用いられている。

【0008】しかしながら、上記のように1.55 $\mu$ mでの波長分散を基準として補償を行う場合、信号光の波長帯域が広がると、1.55 $\mu$ mからの波長のずれが大きいくほど補償誤差が増大するようになる。即ち、図1に示すように、1.3 $\mu$ m零分散SMFの波長分散特性が波長に対して傾きを持つため、例えば、1.53 $\mu$ mの信号光に対する波長分散は $18 - \Delta_s$ ps/nm/kmとなり、1.58 $\mu$ mの信号光に対する波長分散は $18 + \Delta_s$ ps/nm/kmとなる。従って、50km伝送を行った場合には、上記-900ps/nmの補償量を有する分散補償器を使用しても、1.53 $\mu$ mの信号光に対しては $\Delta_s \times 50$ ps/nm分が過補償となり、1.58 $\mu$ mの信号光に対しては $\Delta_s \times 50$ ps/nm分が未補償となる。このように光ファイバ伝送路の波長分散特性が波長に対して傾きをもつために発生する波長分散を一般に2次の分散と呼び、信号光の波長数が多くなったり波長帯域が広がると、1次のみならず2次の分散の補償を行うことが必要となる。

【0009】上述したように、波長多重信号光の帯域として1.55 $\mu$ m帯や1.58 $\mu$ m帯を使用し、1波の伝送速度が2.5Gb/sを超えるような高速のWDM光増幅中継伝送システムが要望されており、このようなシステムの実現には、1次及び2次の波長分散の補償を如何にして効率的に行うかが重要な課題となる。また、上記のような広い波長帯域における波長分散補償を一括して行うようなときには、大きなパワーの信号光が分散補償器に送られることが考えられるため、例えば相互位相変調(XPM)や4光波混合(FWM)等の非線形光学効果が発生し易くなって伝送特性が劣化するおそれがある。

【0010】本発明は上記の点に着目してなされたもので、広帯域の波長多重信号光に対する波長分散を補償可能にする簡易な構成の光増幅器及び光通信システムを提供することを目的とする。また、非線形光学効果の発生確率を低減する波長多重信号光の波長分散補償方法を提供することを目的とする。

## 【0011】

【課題を解決するための手段】このため本発明の波長分散補償機能を備えた光増幅器の1つの態様としては、光波長に応じて複数の波長帯域に分波し、複数の光増幅手段により前記分波した各波長帯域の光をそれぞれ増幅し、該増幅した光を合波する構成の光増幅器であって、波長分散を補償する波長分散補償手段と、前記各光増幅手段内の各々の波長帯域の光を一旦取り出し合波して前記波長分散補償手段に入力するとともに、前記波長分散補償手段から出力される光を前記各波長帯域に分波して前記各光増幅手段に戻す光合分波手段と、を備えて構成されるものである。

【0012】かかる構成によれば、光伝送路等から送られてきた波長多重光は、複数の波長帯域に分波された後

に各光増幅手段に送られて各波長帯域毎に増幅される。この光増幅の際に、各波長帯域の光が光増幅手段から一旦取り出され合波されて波長分散補償手段に送られ、各波長帯域に対する波長分散が補償された後に、再び各波長帯域に分波されて各光増幅手段に戻される。これにより波長分散補償の施された光が各光増幅手段から出力され、それぞれの光を合波した波長多重光が光伝送路等に送出される。従って、波長分散補償機能を備えた光増幅器が簡易な構成により実現されるようになる。

【0013】また、上記の光増幅器について、前記各光増幅手段は、直列に接続された前段光増幅部及び後段光増幅部を備え、前記光合分波手段は、前記各光増幅手段の前段光増幅部及び後段光増幅部の間から信号光を取り出すようにするのが好ましい。このような構成とすることで、適当なパワーの信号光が波長分散補償手段に入力されるため、非線形光学効果の発生や光SN比の劣化が抑制されるようになる。

【0014】さらに、前記各光増幅手段の具体的な構成としては、前記光増幅手段の前記前段光増幅部と前記光合分波手段との間に、可変光減衰器を設けるようにするのがよい。また、前記可変光減衰器は、前記後段光増幅部から出力される光のパワーが一定レベルになるように光減衰量が制御され、前記前段光増幅部及び前記後段光増幅部は、利得が一定になるように制御されるようにするのが好ましい。

【0015】加えて、上述した光増幅器については、前記波長分散補償手段が、分散補償ファイバであり、前記光合分波手段は、前記分散補償ファイバの両端部にそれぞれ接続される2つの光合分波器を有し、前記各光増幅手段から一旦取り出した光のうちの隣り合う波長帯域の光が、異なる前記光合分波器を介して前記分散補償ファイバにそれぞれ入力されるようにするのが好ましい。また、前記各光合分波器は光サーキュレータとしてもよい。

【0016】かかる構成によれば、隣り合う波長帯域の信号光が、異なる光合分波器を介して分散補償ファイバの各端部からそれぞれ入力され、分散補償ファイバ内で互いに異なる方向に伝搬されるようになる。これにより、分散補償ファイバの特定の部分に大きなパワーの信号光が集中するようなことがなくなるとともに、隣り合う波長帯域の光の伝搬方向が対向するようになるため、分散補償ファイバ内での非線形光学効果の発生確率がより低くなる。

【0017】また、本発明の波長分散補償機能を備えた光増幅器の他の態様としては、光波長に応じて複数の波長帯域に分波し、複数の光増幅手段により前記分波した各波長帯域の光をそれぞれ増幅し、該増幅した光を合波する構成の光増幅器であって、予め設定した波長に対する分散量を基準として、波長分散を補償する第1波長分散補償手段と、前記各光増幅手段に送られた各々の波長

帯域の光を一旦取り出し合波して前記第1波長分散補償手段に入力するとともに、前記第1波長分散補償手段から出力される光を前記各波長帯域に分波して前記各光増幅手段に戻す光合分波手段と、前記第1波長分散補償手段で補償されなかった波長分散を各波長帯域毎に個別に補償する第2波長分散補償手段と、を備えて構成されるものである。

【0018】かかる構成によれば、1つの波長分散補償手段で各波長帯域に対する波長分散を補償できない場合には、予め設定した波長に対する分散量を基準として波長分散を補償する第1波長分散補償手段を設けるとともに、該第1波長分散補償手段で補償しきれなかった波長分散を各波長帯域毎に個別に補償する第2波長分散補償手段を設けるようにする。これにより各波長帯域に対して波長分散補償を施すことが可能な光増幅器が比較的簡易な構成により実現される。

【0019】本発明の光通信システムの1つの態様としては、光伝送路を介して直列に接続された複数の光増幅中継器を用いて波長多重信号光を多中継伝送する光通信システムにおいて、前記複数の光増幅中継器は、光波長に応じて複数の波長帯域に分波し、複数の光増幅手段により前記分波した各波長帯域の光をそれぞれ増幅し、該増幅した光を合波する構成の光増幅器であって、それら複数の光増幅中継器は第1と第2の構成を有し、前記第1の構成の光増幅中継器は、予め設定した波長に対する分散量を基準として前記波長多重信号光の波長分散を補償する1つの波長分散補償手段と、前記各光増幅手段に送られた各々の波長帯域の光を一旦取り出し合波して前記波長分散補償手段に入力するとともに、前記波長分散補償手段から出力される光を前記各波長帯域に分波して前記各光増幅手段に戻す光合分波手段と、を備え、前記第2の構成の光増幅中継器は、前記波長分散補償手段で補償されなかった波長分散を各波長帯域毎に個別に補償可能な波長分散補償手段を備えるようにしたものである。特に、前記第1の構成の光増幅中継器と前記第2の構成の光増幅中継器とが、1つおきに交互に配置されるようにするのが好ましい。

【0020】かかる構成によれば、複数の光増幅中継器を介して多中継伝送される波長多重信号光が、第1の構成の光増幅中継器を通過する際には、1つの波長分散補償手段により光伝送路の波長分散特性が補償される。ここでの波長分散補償は、予め設定した波長に対する分散量を基準としており、各波長帯域すべてについて十分な分散補償は行われたい。このため、波長多重信号光が第2の構成の光増幅中継器を通過する際に、補償しきれなかった波長分散を各波長帯域毎に個別に補償するようにする。これにより、複数の光増幅中継器全体として光伝送路の波長分散特性が補償可能となる。従って、第1の構成の光増幅中継器は簡易な構成となるため、波長分散機能を備えた光通信システムの実現が容易なものとな

る。

【0021】また、本発明の波長分散補償方法は、波長多重信号光の波長分散を分散補償ファイバを用いて補償する波長多重信号光の波長分散補償方法において、前記波長多重信号光を波長に応じて複数の波長帯域に分波し、該分波した光のうちの隣り合う波長帯域の光を、前記分散補償ファイバの異なる端部からそれぞれ入力し、前記分散補償ファイバの各端部からそれぞれ出力される各波長帯域の光を合波してなるものである。

【0022】かかる方法によれば、隣り合う波長帯域の光が、分散補償ファイバの異なる端部からそれぞれ入力され、分散補償ファイバ内を互いに異なる方向に伝搬されるようになる。これにより、分散補償ファイバの特定の部分に大きなパワーの光が集中するようなことがなくなるとともに、隣り合う波長帯域の光の伝搬方向が対向するようになるため、分散補償ファイバ内での非線形光学効果の発生確率がより低くなる。

#### 【0023】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。まず最初に、例えば1.55 $\mu$ m帯(1.53~1.56 $\mu$ m)及び1.58 $\mu$ m帯

(1.57~1.60 $\mu$ m)を波長帯域とする波長多重信号光の増幅を行う光増幅器として考えられている基本構成について説明する。

【0024】一般に使用されている光増幅器、特に、光ファイバ増幅器では、上記のような60nmを超える広い帯域にわたって等しい利得を得ることは難しい。そこで、例えば波長帯域を1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯の2つに分割し、それぞれの帯域で等しい利得が得られる光ファイバ増幅器を用いる構成が考えられている。このような光増幅器の基本構成を図1のブロック図に示す。

【0025】図1の光増幅器では、1本の光ファイバから送られてくる波長多重信号光が、WDMカプラ1で1.55 $\mu$ m帯の光と1.58 $\mu$ m帯の光に分波される。そして、1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯の各波長多重信号光は、1.55 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅部2及び1.58 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅部3にそれぞれ送られて各波長成分がほぼ等しい利得で増幅される。光ファイバ増幅器2、3で増幅された各々の波長多重信号光は、WDMカプラ4で合波されて1本の光ファイバに出力される。

【0026】以下に示す本発明の各実施形態に係る光増幅器は、上記のような基本構成を有する光増幅器について適用されるものであり、1波あたりについて2.5Gb/sを超える伝送速度、例えば10Gb/sで伝送される波長多重信号光の増幅処理を行う場合に、光増幅器内で波長分散補償を行えるようにしたものである。図2は、本発明の第1の実施形態に係る光増幅器の構成を示すブロック図である。ただし、第1の実施形態では、

1.3 $\mu$ m零分散SMFの1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯に対する波長分散特性を一括して補償可能な2次分散補償型の分散補償ファイバ(DCF)の使用を前提とする。

【0027】図2において、本光増幅器は、上述した基本構成について、1.55 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅部2及び1.58 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅部3をそれぞれ2段増幅型の構成とし、後段光増幅部に送られる前の各波長帯の信号光を取り出してWDMカプラ10で一旦合波した後にDCF11に送り、DCF11を通過した信号光をWDMカプラ12で1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯に再び分波して、各光ファイバ増幅部2、3の後段光増幅部に戻すようにしたものである。従って、ここでは、各光ファイバ増幅部2、3が光増幅手段として機能し、DCF11が波長分散補償手段として機能し、WDMカプラ10、12が光合分波手段として機能する。

【0028】1.55 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅部2の構成は、例えば、前段光増幅部としての光ファイバ増幅器20と、後段光増幅部としての光ファイバ増幅器24と、各光ファイバ増幅器20、24の間に設けられた可変光減衰器(ATT)22とを備えるものとする。また、それぞれの光ファイバ増幅器20、24には、増幅利得を一定に制御する自動利得制御(AGC)回路21、25が設けられ、さらに、ATT22には、後段の光ファイバ増幅器24から出力される信号光のパワーレベルが一定になるように可変減衰量を制御する自動レベル制御(ALC)回路23が設けられている。各光ファイバ増幅器20、24は、例えば図示しないが、0.98 $\mu$ m帯や1.48 $\mu$ m帯の励起光により励起状態とされたエルビウムドープファイバ(EDF)に1.55 $\mu$ m帯の信号光を送ることで、1.55 $\mu$ m帯の各波長光をほぼ等しい利得で増幅するものである。

【0029】なお、上記の構成は、例えば、本出願人の先願である特開平8-248455号公報等に記載された光ファイバ増幅器の構成と同様であり、ここでの具体的な説明は省略する。1.58 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅部3の構成も、1.55 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅部2の構成と同様に、AGC回路31、35を備えた光ファイバ増幅器30、34と、ALC回路33を備えた可変光減衰器(ATT)32とを備えるものとする。ただし、各光ファイバ増幅器30、34には、公知の1.58 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅器を用いており、1.58 $\mu$ m帯で光増幅作用が生じるように、例えば、1.55 $\mu$ m帯の光ファイバ増幅器と比べてEDF長を長くしてある等の違いがある。

【0030】1.58 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅器の動作原理を簡単に説明すると、1.48 $\mu$ m帯または0.98 $\mu$ m帯の励起光によりEDF内のエルビウム原子が励起され、EDFの前半部分で1.55 $\mu$ m帯自然放光(ASE)が発生する。この1.55 $\mu$ m帯ASEがE

10

20

30

40

50

DFの後半部分において再吸収されることにより、 $1.58\mu\text{m}$ 帯の誘導放出が生じる。この $1.58\mu\text{m}$ 帯の誘導放出断面積は $1.55\mu\text{m}$ 帯のものに比べて小さく、また十分に大きな $1.55\mu\text{m}$ 帯ASEを発生させる必要があるため、例えば、EDFのファイバ長を長くするなどして $1.58\mu\text{m}$ 帯の光増幅を実現させている。

【0031】各WDMカプラ10、12は、WDMカプラ1、4と同様に、 $1.55\mu\text{m}$ 帯及び $1.58\mu\text{m}$ 帯の光が所定のポートに入力されると、それらの光を合波して1つのポートから出力し、これとは逆に、 $1.55\mu\text{m}$ 帯及び $1.58\mu\text{m}$ 帯が合波された光が入力されると、その光を $1.55\mu\text{m}$ 帯の光と $1.58\mu\text{m}$ 帯の光とに分波して所定のポートから出力するものである。

【0032】DCF11は、前述したように、 $1.55\mu\text{m}$ 帯及び $1.58\mu\text{m}$ 帯を含む広帯域な2次分散補償型の分散補償ファイバとする。具体的には、上述の図1に示した $1.3\mu\text{m}$ 零分散SMFの波長分散特性とは対称的な、負の符号及び負の傾きの波長分散特性を有する分散補償ファイバを用いる。このDCF11は、SMFに比べて損失が大きく、ここでは、例えば長さが10km前後で10dB程度の損失があるものとする。

【0033】また、本実施形態では、出力側のWDMカプラ4の後段に、光カプラ13が設けてある。この光カプラ13は、本光増幅器の出力光となるWDMカプラ4で合波された波長多重信号光の一部を、例えば10:1の分岐比等で取り出してモニタ光を得るためのものである。なお、図2では、 $1.55\mu\text{m}$ 帯用の光増幅器の入力及び出力をコネクタインターフェースであるとしている。このようにすると、単に $1.55\mu\text{m}$ 帯用光増幅器の入出力を入れ換えるだけで、後述する図3に示すような双方向光増幅器が実現できる。これは本構成では $1.55\mu\text{m}$ 帯、 $1.58\mu\text{m}$ 帯の両者ともに可変光減衰器によりALCを実現しているために可能となる。即ち、光増幅器を設定するポイントの入力側と出力側のスパンロスが異なっても、可変光減衰器がスパンロスの変動を吸収するので、単方向、双方向の選択が可能となるのである。

【0034】次に、本実施形態の動作について説明する。まず、 $1.3\mu\text{m}$ 零分散SMF内を伝送されてきた波長多重信号光が本光増幅器のWDMカプラ1に入射されると、その波長多重信号光が波長帯に応じて分波され、 $1.55\mu\text{m}$ 帯の信号光成分が $1.55\mu\text{m}$ 帯用光ファイバ増幅部2に送られ、 $1.58\mu\text{m}$ 帯の信号光成分が $1.58\mu\text{m}$ 帯用光ファイバ増幅部3に送られる。ここで、波長多重信号光の具体的な一例を挙げると、

$1.55\mu\text{m}$ 帯の信号光としては、 $1535\text{nm}$ から $1565\text{nm}$ までの波長帯に32波の信号光が多重され、 $1.58\mu\text{m}$ 帯の信号光としては、 $1575\text{nm}$ から $1605\text{nm}$ までの波長帯に32波の信号光が多重されたものなどとすることができる。なお、本発明の波長多重

信号光はこれに限られるものではない。

【0035】 $1.55\mu\text{m}$ 帯用光ファイバ増幅部2に入力された信号光は、最初に光ファイバ増幅器20で所定のレベルまで増幅される。この光ファイバ増幅器20では、AGC回路21により利得が一定に制御されているため、広い入力レンジで利得の波長特性が一定となる。そして、光ファイバ増幅器20から出力された信号光は、可変光減衰器22に送られALC回路23によって制御された光減衰量に応じて減衰される。可変光減衰器22を通った信号光はWDMカプラ10に送られる。

【0036】また、 $1.58\mu\text{m}$ 帯用光ファイバ増幅部3に入力された信号光も、 $1.55\mu\text{m}$ 帯の信号光と同様に、光ファイバ増幅器30で所定のレベルまで増幅され、可変光減衰器32で減衰されて、WDMカプラ10に送られる。WDMカプラ10では、各可変光減衰器22、32から送られてくる各波長帯の信号光が合波されて、DCF11に送られる。合波された信号光は、DCF11を通過することで、 $1.55\mu\text{m}$ 帯及び $1.58\mu\text{m}$ 帯に対する1次及び2次の波長分散が一括して補償される。この際、信号光は、DCF11の損失を受けて、出力時のパワーが入力時のパワーに比べて約10dB程度小さくなる。そして、DCF11から出力された信号光は、WDMカプラ12で $1.55\mu\text{m}$ 帯と $1.58\mu\text{m}$ 帯とに再び分波されて、各波長帯の後段の光ファイバ増幅器24、34にそれぞれ送られる。

【0037】各光ファイバ増幅器24、34では、対応する波長帯の信号光が所定のレベルまで一定の利得で増幅される。増幅された各信号光の一部はALC回路23、33に戻されて、各光ファイバ増幅部2、3の出力光レベルを一定にする制御が行われる。そして、各々の光ファイバ増幅部2、3から出力される一定レベルに制御された信号光は、WDMカプラ4にそれぞれ送られる。

【0038】WDMカプラ4では、増幅及び波長分散補償の施された $1.55\mu\text{m}$ 帯及び $1.58\mu\text{m}$ 帯の信号光を合波して光カプラ13に送る。光カプラ13では、WDMカプラ4からの波長多重信号光を本光増幅器の出力光として出射するとともに、その一部をモニタ光として分岐する。このモニタ光は、例えば、本光増幅器から出力される波長多重信号光のスペクトルを監視して、各波長帯の信号光パワーがほぼ等しくなるように各光ファイバ増幅部2、3の動作状態を調整するためなどに利用可能である。これは、例えば、本光増幅器が増設性を具備し、波長多重数の増加に伴って $1.58\mu\text{m}$ 帯用光ファイバ増幅部3を増設するような場合に、接続状態の確認や動作状態の調整を可能にする手段として特に有用である。或いは、モニタ光から各波長光を抽出してそれぞれの信号波形を監視すれば、波長分散補償が有効に行われているか否かを確認する手段としても利用可能である。

【0039】上述したように第1の実施形態によれば、高速に伝送される波長多重信号光を2つの波長帯域に分割して増幅を行う光増幅器について、それぞれの波長帯に対する波長分散を一括して補償可能なDCFを光増幅器内に内蔵させたことにより、波長分散補償機能を備えた光増幅器を簡易な構成により実現することができる。これは、例えば1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯毎にそれぞれDCFを設ける場合と比べると、高価なDCFの数を減らすことができるため、波長分散補償機能を備えた光増幅器の低価格化を可能にするものであるなお、第1の実施形態では、各波長帯の光ファイバ増幅器24, 34に入力される前の各信号光と取り出してDCF11に送る構成としたが、本発明はこれに限らず、例えば、各光ファイバ増幅器24, 34から出力される信号光など各光ファイバ増幅器2, 3の任意の位置における信号光を取り出してDCF11に送る構成とすることも可能である。ただし、非線形光学効果の影響や雑音特性等を考慮すると、第1の実施形態の構成のように、前段光増幅部と後段光増幅部との間の信号光を取り出すようにするのが最適である。即ち、後段光増幅部で増幅された各信号光を取り出す場合には、非常に大きなパワーの信号光がコア径の小さいDCFに入力されることになるため、非線形光学効果の発生する確率が高くなってしまふ。一方、前段光増幅部で増幅される前の各信号光を取り出す場合には、比較的小さなパワーの信号光が損失の大きなDCFに入力されることになるため、光SN比が劣化してしまふ。従って、前段光増幅部で増幅された後、後段光増幅部で増幅される前の信号光をDCFに送るのが好ましいのである。

【0040】次に、本発明の第2の実施形態について説明する。上述した第1の実施形態では、1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯の各信号光が同一方向に伝送されるものとしたが、第2の実施形態では、各波長帯の信号光が対向して双方向に伝送される場合について考える。図3は、第2の実施形態の光増幅器の構成を示すブロック図である。

【0041】図3において、本光増幅器の構成が第1の実施形態の構成と異なる部分は、1.55 $\mu$ m帯信号光の伝送方向が逆方向（図で右から左）となったのに合わせて、1.55 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅器2の各構成の配置を反転させた部分である。これ以外の構成は、第1の実施形態の構成と同様である。かかる構成の光増幅器では、1.55 $\mu$ m帯の信号光が、WDMカプラ4を介して1.55 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅器2に送られる。また、1.58 $\mu$ m帯の信号光が、WDMカプラ1を介して1.58 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅器3に送られる。そして、各波長帯の信号光は、第1の実施形態の場合と同様に、光ファイバ増幅器20, 30でそれぞれ増幅され、可変光減衰器22, 32でそれぞれ減衰される。可変光減衰器22から出力された1.55 $\mu$ m帯信号光

は、WDMカプラ12を介してDCF11の図で右側のポートから入力される。一方、可変光減衰器32から出力された1.58 $\mu$ m帯信号光は、WDMカプラ10を介してDCF11の図で左側のポートから入力される。DCF11に入力された各波長帯の信号光は、DCF11内を互いに異なる方向に伝搬することで波長分散補償が施される。

【0042】ここで、第1の実施形態の作用と異なる点は、DCF11内で非線形光学効果が発生する確率が低く抑えられるという点である。即ち、DCF11での損失が10dB程度と大きいと、DCF11内を伝搬する各信号光のパワーは、例えば図4に示すように変化する。従って、入力される各信号光のパワーがたとえ大きくなっても、DCF11内の特定の部分に大きな光パワーが集中するようなことがなくなる。また、DCF11内の各信号光の伝搬方向が逆方向にもなる。これらの相乗効果により、非線形光学効果が発生し難くなるのである。

【0043】DCF11を通過した各波長帯の信号光は、WDMカプラ10, 12を介して対応する波長帯の各光ファイバ増幅器24, 34に送られて、所定のレベルまで増幅される。そして、光ファイバ増幅器24から出力された1.55 $\mu$ m帯信号光は、WDMカプラ1を介して外部のSMFに出力され、一方、ファイバ増幅器34から出力された1.58 $\mu$ m帯信号光は、WDMカプラ4を介して外部のSMFに出力される。

【0044】上述したように第2の実施形態によれば、2つの波長帯の信号光が双方向に伝送される場合についても、第1の実施形態の場合と同様にして、波長分散補償機能を備えた光増幅器を簡易な構成により実現することができる。加えて、各波長帯の信号光がDCFの異なるポートから入力されるようになるため、DCFにおける非線形光学効果の発生確率を低減することができ、より安定した伝送特性を得ることが可能となる。

【0045】なお、上記第2の実施形態では、WDMカプラ10, 12を介して各波長帯の信号光をDCF11に入出射させる構成としたが、本発明はこれに限らず、例えば図5に示すように、WDMカプラ10, 12に代えて光サーキュレータ14, 15を用いることも可能である。各光サーキュレータ14, 15は、3つの端子 $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ を有し、各端子間において、順方向の $t_1 \rightarrow t_2$ ,  $t_2 \rightarrow t_3$ ,  $t_3 \rightarrow t_1$ の方向に進む光は低損失で、逆方向に進む光は高損失となる公知の光回路素子である。

【0046】次に、本発明の第3の実施形態について説明する。第3の実施形態は、第1の実施形態の光増幅器の改良例であって、2つの波長帯の伝送方向が同一方向である場合に、DCF11での非線形光学効果の発生を低減させたものである。図6は、第3の実施形態の光増幅器の構成を示すブロック図である。

【0047】図6において、本光増幅器は、第1の実施形態の光増幅器について、1.55 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅器2の可変光減衰器22から出力される信号光が、WDMカプラ12を介してDCF11に入力され、DCF11を通過した1.55 $\mu$ m帯の信号光がWDMカプラ10を介して光ファイバ増幅器24に送られるように、それぞれの接続を変更したものである。

【0048】かかる構成の光増幅器では、第2の実施形態の場合と同様に、各波長帯の光可変減衰器22、32から出力された信号光が、それぞれDCF11の異なるポートから入力され、DCF11内を互いに逆方向に伝搬するようになる。これにより、DCF11への各入力光パワーがたとえ大きくなっても、大きな光パワーが一方のポート付近に集中するようなことがなく、また、各信号光の伝搬方向が逆向きとなるため、非線形光学効果が発生し難くなる。

【0049】このように第3の実施形態によれば、各波長帯の伝送方向が同一方向であっても、DCF11内の伝搬方向だけは対向させるようにしたこと、非線形光学効果の発生確率を低減することができ、より安定した伝送特性を得ることが可能となる。なお、上記第3の実施形態では、WDMカプラ10、12を介して各波長帯の信号光をDCF11に入出射させる構成としたが、上述したように、WDMカプラ10、12に代えて光サーキュレータ14、15を用いてもよい。この場合の構成を図7のブロック図に示す。

【0050】次に、本発明の第4の実施形態について説明する。上述した第1～第3の実施形態においては、各波長帯に対する波長分散を一括して補償可能なDCFの使用を前提としていた。以下の第4、5の実施形態においては、このような広い帯域について1次及び2次の波長分散を補償できるDCFが使用できない状況を想定し、第4の実施形態では、1つの光増幅器内部で全帯域に対する波長分散補償を可能にする場合を考える。

【0051】図8は、第4の実施形態の光増幅器の構成を示すブロック図である。図8に示す光増幅器は、例えば、第1の実施形態の光増幅器について、DCF11に代えて、1.58 $\mu$ m帯に対する補償量が不足するDCF11'（第1波長分散補償手段）を用いる場合に、可変光減衰器32とWDMカプラ10との間にDCF11''（第2波長分散補償手段）を設けたものである。上記以外の構成は、第1の実施形態の構成と同様である。

【0052】DCF11'は、例えば、1.55 $\mu$ m帯の予め設定した波長に対する分散量を基準として補償量が設定されており、1.55 $\mu$ m帯に対する1次及び2次の波長分散補償については可能であるが、1.58 $\mu$ m帯に対する波長分散補償を十分に行うことができず未補償分が生じるようなものとする。DCF11''は、その補償量がDCF11'の未補償分に対応させて調整されたものである。従って、1.58 $\mu$ m帯の信号光は、

DCF11''及び11'をそれぞれ通過させることで、1次及び2次の波長分散が補償されるようになる。

【0053】このように、全波長帯域に対する分散補償を1つのDCFで一括して行うことができない場合、2つのDCF11'、11''を設けることで比較的簡易な構成の1つの光増幅器により全波長帯域に対する分散補償を行うことができる。なお、上記第4の実施形態では、可変光減衰器32とWDMカプラ10との間にDCF11''を設けるようにしたが、DCF11''の配置はこれに限らず、例えばWDMカプラ12と光ファイバ増幅器34との間などとしてもよい。

【0054】次に、本発明の第5の実施形態について説明する。第5の実施形態では、SMFを介して直列に接続された複数の光増幅中継器により、全波長帯域に対する波長分散補償を可能にする光通信システムを考える。図9は、第5の実施形態に係る光通信システムの概略構成を示す図である。図9において、本光通信システムは、例えば、1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯に配置された波長の異なるN波の信号光を発生する光送信器Tx1～TxNから送信された信号光をマルチプレクサ(MUX)で多重して1本のSMFに出力し、該波長多重信号光をn個の光増幅中継器AMP1～AMPnで順次増幅しながら伝送した後に、デマルチプレクサ(DMUX)で各波長毎に分波して対応する光受信器Rx1～RxNで受信する構成である。

【0055】この光通信システムで用いられる光増幅中継器AMP1～AMPnのうちの、例えば奇数番目の光増幅中継器AMP1、AMP3、…（第1の構成の光増幅中継器）は、上述した第1の実施形態の構成（図2参照）と同様とする。ただし、これら光増幅中継器AMP1、AMP3、…に用いられる各DCF11は、各波長帯に対する波長分散を一括して補償できるだけの十分に広い帯域を有していないため、未補償または過補償が生じるものとする。

【0056】一方、補正用光増幅中継器としての偶数番目の光増幅中継器AMP2、AMP4、…（第2の構成の光増幅中継器）は、例えば図10に示すような構成とする。図10において、偶数番目の光増幅中継器AMP2、AMP4、…は、1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯のそれぞれについて、各可変光減衰器22、32から出力された信号光をDCF16、17をそれぞれ介して各光ファイバ増幅器24、34に送る構成とする。各DCF16、17は、前段のSMFにおける波長分散及び前段の光増幅中継器で補償できなかった波長分散とを各波長帯毎に個別に補償するために設けられたものである。

【0057】各DCFの具体的な設定例を挙げると、奇数番目の光増幅中継器AMP1、AMP3、…に用いるDCFについて、使用波長帯のほぼ中心となる1.57 $\mu$ m前後の波長に対する分散量を基準としたものとする



と、1.55  $\mu\text{m}$ 帯に対しては過補償が生じ、1.58  $\mu\text{m}$ 帯に対しては未補償が生じる。この場合には、偶数番目の光増幅中継器AMP 2, AMP 4, ...に用いる1.55  $\mu\text{m}$ 帯用DCF 16として、過補償分に対応した正の波長分散を有するものを用い、1.58  $\mu\text{m}$ 帯用DCF 17として、未補償分に対応した負の波長分散を有するものを用いるようにする。

【0058】或いは、奇数番目の光増幅中継器AMP 1, AMP 3, ...に用いるDCFについて、1.53  $\mu\text{m}$ 前後の波長に対する分散量を基準としたものとする。1.55  $\mu\text{m}$ 帯及び1.58  $\mu\text{m}$ 帯に対してそれぞれ未補償が生じる。この場合には、偶数番目の光増幅中継器AMP 2, AMP 4, ...に用いる各DCF 16, 17として、各波長帯に対する未補償分にそれぞれ対応した負の波長分散を有するものを用いるようにする。

【0059】このような光通信システムでは、奇数番目の光増幅中継器AMP 1, AMP 3, ...については、単一のDCFを用いた比較的簡易な構成とすることができ、それら奇数番目の光増幅中継器AMP 1, AMP 3, ...で補償できなかった波長分散は、各波長帯毎にDCFを設けた偶数番目の光増幅中継器AMP 2, AMP 4, ...で補償されるようになる。従って、光通信システム全体として、より少ない数のDCFで広い帯域に対する分散補償を行うことができ、高速かつ広帯域で伝送特性に優れた光通信システムが低コストで実現可能となる。

【0060】なお、上記第5の実施形態では、複数の光増幅中継器について、単一のDCFでは補償しきれなかった波長分散を補うための光増幅中継器を1つおきに配置する構成としたが、本発明はこれに限らず、複数の光増幅中継器のうちの少なくとも1つの光増幅中継器が、補償しきれなかった波長分散をまとめて補うようにしてもよい。ただし、波長分散の影響による波形歪みは分布定数的に発生するので、上記実施形態のように分散補償をこまめに行うようにした方が、より優れた伝送特性を得ることができる。

【0061】また、上述した第1～5の実施形態では、波長多重信号光を1.55  $\mu\text{m}$ 帯及び1.58  $\mu\text{m}$ 帯の2つの波長帯域に分波する場合を説明したが、本発明はこれに限らず、上記以外の波長帯や3以上の波長帯域に波長多重信号光を分波するようにしても構わない。ここで、図2、3、5～8及び10に示した各々の光ファイバ増幅器及びAGC回路の具体的な構成例を、図12のブロック図を用いて説明しておく。

【0062】図12において、左方から入力された各波長帯域の光は、第1の分岐カプラにより分岐され、第1フォトダイオード(PD)で受光されて、入力光レベルがAGC制御回路で検出される。一方、エルビウムドープファイバ(EDF)に送られ増幅された光は、第2の分岐カプラにより分岐され、第2PDで受光されて、出

力光レベルがAGC制御回路で検出される。

【0063】AGC制御回路は、第1PD及び第2PDで受光された光レベルを基に、光ファイバ増幅器のゲインを所定のゲイン(通常は一定のゲイン)になるように、EDFを励起するための励起光源である第1レーザダイオード(LD)及び第2LDの光出力レベルを制御する。第1LD及び第2LDからの出力は、第1のWDMカプラ及び第2のWDMカプラによりEDFにそれぞれ入力される。

10 【0064】第1の分岐カプラと第1のWDMカプラの間及び第2のWDMカプラと第2の分岐カプラの間には、光アイソレータ(ISO)がそれぞれ設けられている。第1LD、第2LDとしては、0.98  $\mu\text{m}$ 帯のレーザ及び1.48  $\mu\text{m}$ 帯のレーザをそれぞれ使用することができるが、望ましくは、第1LDに0.98  $\mu\text{m}$ 帯のレーザを使用し、第2LDに1.48  $\mu\text{m}$ 帯のレーザを使用するのが良い。

20 【0065】また、図2、3、5～8及び10の可変光減衰器は、電気的制御により光減衰量を可変にするものがよく、例えば、磁気光学結晶のファラデー回転角を制御して減衰量を可変にする光減衰器を利用することが望ましい。

【0066】

30 【発明の効果】以上説明したように、本発明の波長分散補償機能を備えた光増幅器によれば、広帯域光を複数の波長帯域に分波して増幅を行う光増幅器について、それぞれの波長帯域に対する波長分散を補償可能な波長分散補償手段を光増幅器内に内蔵させたことにより、波長分散補償機能を備えた光増幅器を簡易な構成により実現することができる。加えて、隣り合う波長帯域の光を分散補償ファイバの異なる端部から入力して、分散補償ファイバ内の各波長帯域の光の伝搬方向が逆向きになるようにしたことで、分散補償ファイバ内における非線形光学効果の発生が低減され、伝送特性の安定化を図ることが可能となる。

40 【0067】また、各波長帯域に対する波長分散を1つの波長分散補償手段で補償しきれない場合には、その補償できなかった波長分散を各波長帯毎に個別に補う第2波長分散補償手段を設けることで、すべての波長帯域に対する分散補償を1つの光増幅器内で行うことが可能である。本発明の光通信システムによれば、複数の光増幅中継器のうちの第1の構成の光増幅中継器については、1つの波長分散補償手段を用いた比較的簡易な構成とすることができ、それらの光増幅中継器で補償できなかった波長分散については、第2の構成の光増幅中継器において各波長帯毎に個別に補償を行うようにしたことで、複数の光増幅中継器全体として各波長帯域に対する分散補償を行うことができる。従って、波長分散補償機能を備えた光通信システムの低コスト化を図ることができる。

【0068】本発明の波長多重信号光の波長分散補償方法によれば、隣り合う波長帯域の信号光を分散補償ファイバの異なる端部から入力して、分散補償ファイバ内の各信号光の伝搬方向が逆向きになるようにしたこと、分散補償ファイバでの非線形光学効果の発生確率を低減させることができ、安定した伝送特性を得ることが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】1.55 $\mu$ m帯及び1.58 $\mu$ m帯の波長多重信号光を増幅する光増幅器の基本構成を示す図である。

【図2】本発明の第1の実施形態に係る光増幅器の構成を示すブロック図である。

【図3】本発明の第2の実施形態に係る光増幅器の構成を示すブロック図である。

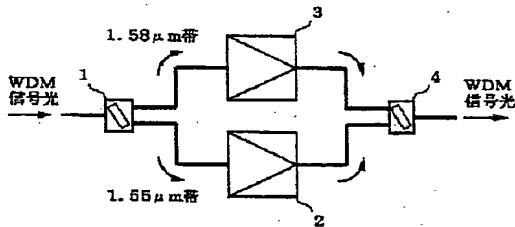
【図4】同上第2の実施形態における各波長帯の信号光パワーのDCF内での変化の様子を示す図である。

【図5】同上第2の実施形態に関して、光サーキュレータを使用した場合の構成例を示す図である。

【図6】本発明の第3の実施形態に係る光増幅器の構成を示すブロック図である。

【図7】同上第3の実施形態に関して、光サーキュレータを使用した場合の構成例を示す図である。

【図1】



【図8】本発明の第4の実施形態に係る光増幅器の構成を示すブロック図である。

【図9】本発明の第5の実施形態に係る光通信システムの概略構成を示すブロック図である。

【図10】同上第5の実施形態に用いる偶数番目の光増幅中継器の構成を示すブロック図である。

【図11】1.3 $\mu$ m零分散SMFの波長分散特性を示す図である。

【図12】光ファイバ増幅器とAGC回路の具体的な構成を示すブロック図である。

【符号の説明】

1, 4, 10, 12...WDMカプラ

2...1.55 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅器

3...1.58 $\mu$ m帯用光ファイバ増幅器

11, 11', 11'', 16, 17...分散補償ファイバ (DCF)

13...光カプラ

14, 15...光サーキュレータ

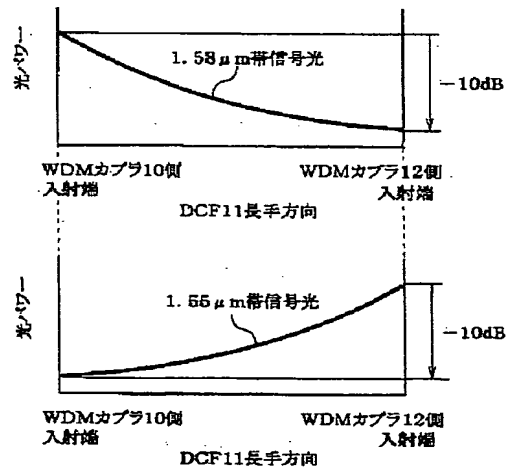
20, 24, 30, 34...光ファイバ増幅器

21, 25, 31, 35...AGC回路

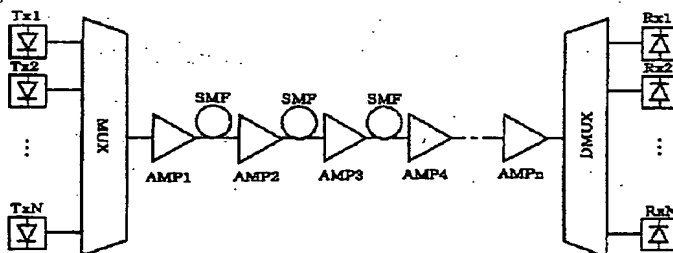
22, 32...可変光減衰器 (ATT)

23, 33...ALC回路

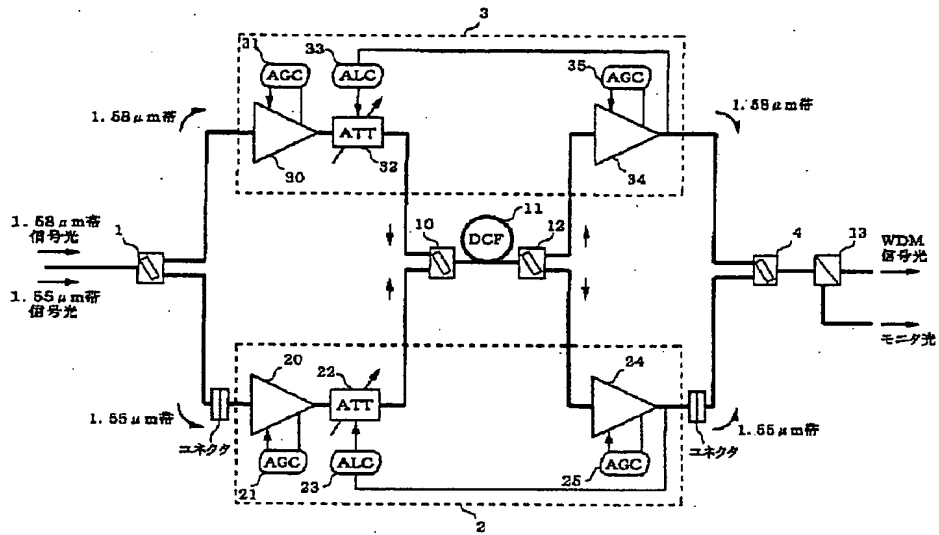
【図4】



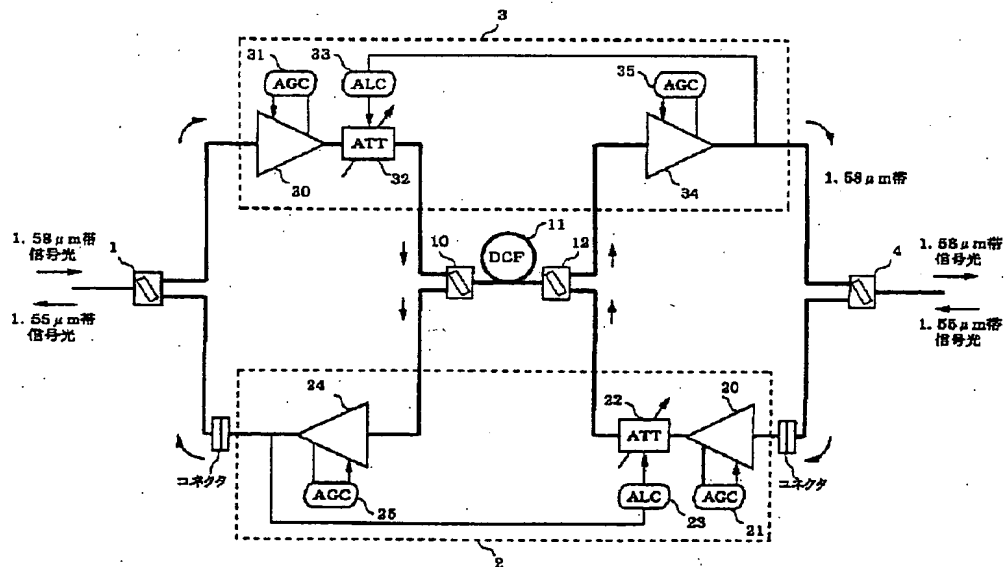
【図9】



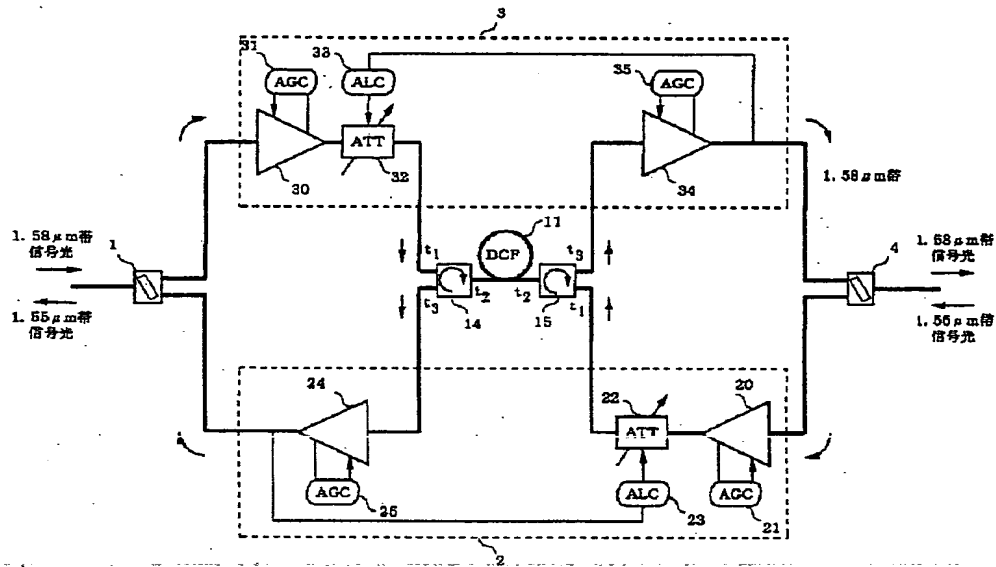
【図2】



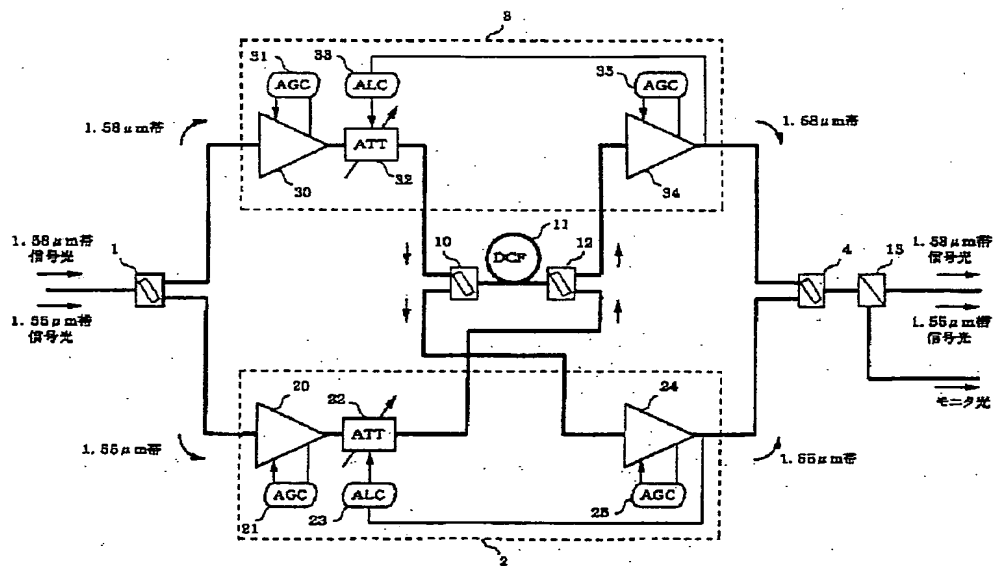
【図3】



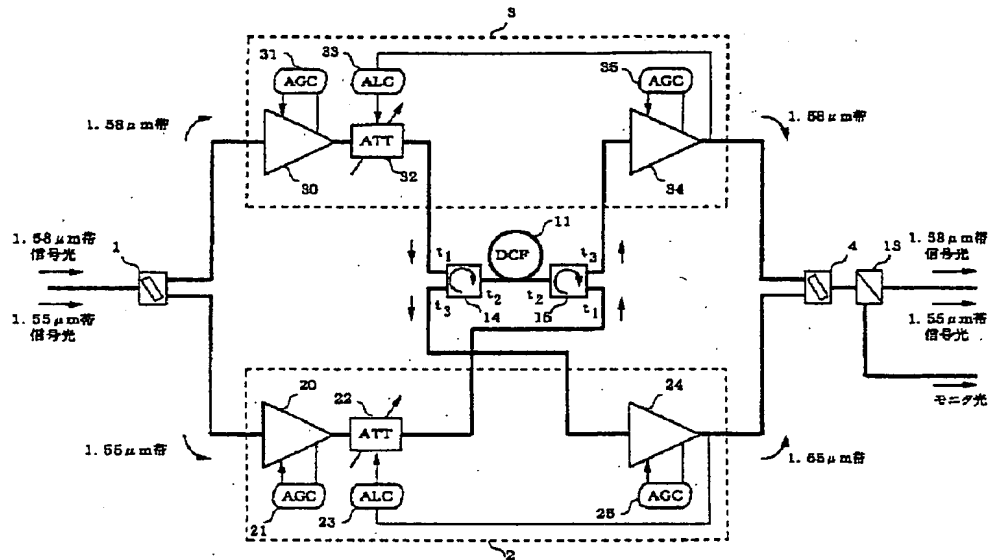
【図 5】



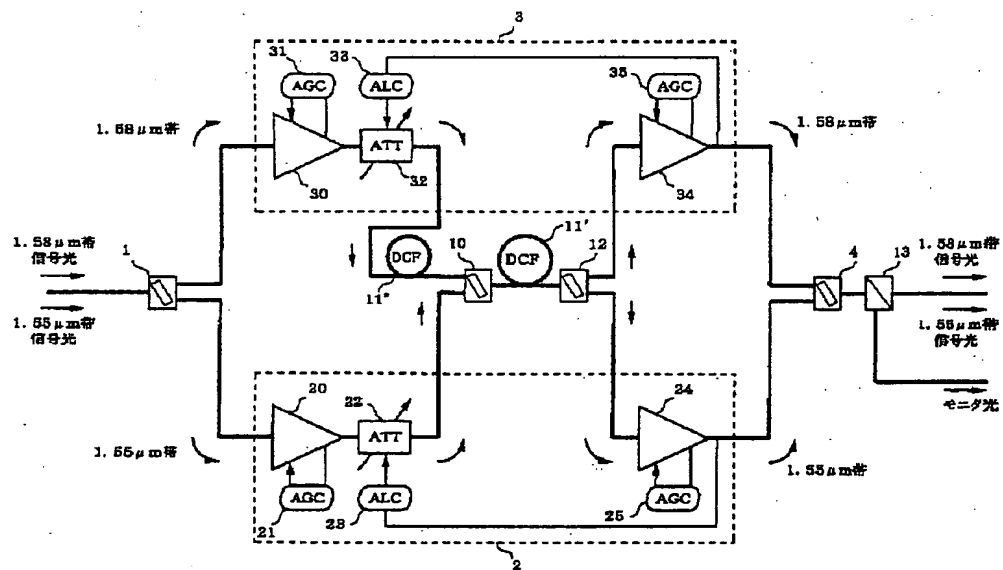
【図 6】



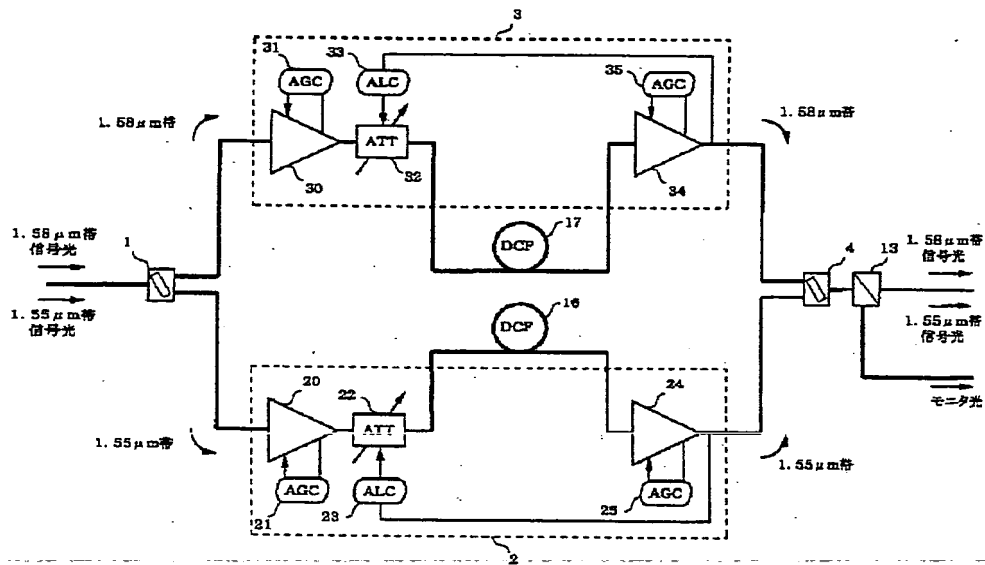
【図 7】



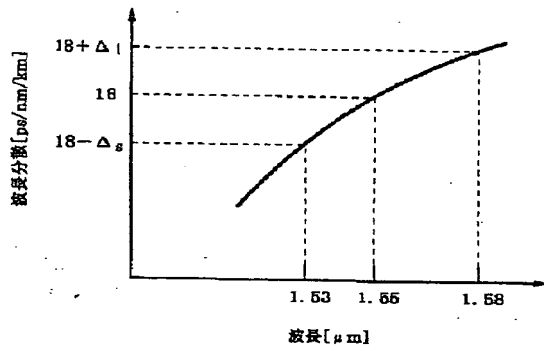
【図 8】



【図10】



【図11】



【図12】

